心理科学进展 2023, Vol. 31, No. 5, 747–758
Advances in Psychological Science

https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2023.00747

汉语作为第二语言学习的脑机制*

张才蕙[1,2] 叶渐桥[2,3] 杨 静[4]

([1]广东外语外贸大学外国语言学及应用语言学研究中心双语认知与发展实验室，广州 510420)
([2]广东外语外贸大学英语语言文化学院，广州 510420)
([3]蓝帆医疗股份有限公司，上海 201318) ([4]浙江大学外国语学院，杭州 310058)

摘 要 国家兴，语言强。近年来，汉语作为第二语言学习的认知神经机制研究日渐增长，但汉语二语学习脑机制的系统归纳及相关理论模型仍处于起步阶段。基于汉语二语学习近20年的脑机制研究，以及最新二语学习脑机制的研究和理论，可以归纳主要发现为：1)汉语声调学习最初依赖右颞上回和右额下回，掌握后转而依赖左颞上回；2)汉字字形学习与双侧额下回及右梭状回有关，而汉字语音学习则与左颞顶叶区相关；3)汉语二语学习初期会依赖右脑重要脑区(额下回、梭状回等)，随汉语能力的提升，这种依赖减弱。综上，汉语二语学习与右脑关系密切，经历了由右侧功能主导转向双侧化或者左侧化的动态大脑发展变化过程。汉语学习者所采取的二语学习方法及其语音听辨能力，会影响学习者的语言功能、脑结构及其脑功能网络连接方式。未来研究可以从被试语言背景、研究范式和内容、数据分析等角度出发，探寻汉语二语学习的有效方法，构建并完善汉语二语学习认知神经机制的相关理论模型。

关键词 汉语二语学习，磁共振影像，脑功能，脑结构，脑功能网络
分类号 B845.1 G442

1 引言

随着我国国际地位及国际影响力的显著提高，中华语言文化的发展传播进入了一个全新阶段，全球“汉语热”不断升温。汉语作为二语学习的认知神经机制研究，不但可以对以西方语言为主的第二语言学习理论体系进行有益补充，也可以为汉语二语教学提供科学依据。

1.1 汉语作为二语学习的脑机制研究

近年来研究者们通过纵向追踪，基于实验室训练或者自然环境学习等不同学习方式，考察了第二语言学习伴随的脑功能(如 Liu et al., 2021; Nichols & Joanisse, 2016; Saidi et al., 2013; Veroude et al., 2010; Yang & Li, 2019; Yang et al., 2015)和脑结构(如 Crinion et al., 2009; Klein et al., 2014; Li et al., 2014; Liu et al., 2021; Mårtensson et al., 2012; Pliatsikas et al., 2020; Qi et al., 2015; Schlegel et al., 2012)变化。梅磊磊等(2017)综述了第二语言学习所引发的脑机制变化：第二语言学习者主要依赖母语加工的脑网络来学习和加工第二语言；母语加工和第二语言学习之间存在相互作用；第二语言学习中个体的学习表现可以通过其认知行为、脑功能(任务态和静息态)和脑结构等指标进行预测。这一综述涉及的第二语言范围较广(包括日语、韩语、英语、汉语等多种语言)，并未聚焦于汉语作为第二语言学习所引发的脑机制变化。已有大量研究发现双语者加工两种语言的神经网络相似(如 Feng et al., 2020; Li et al., 2021; Liu & Cao, 2016; Sulpizio et al., 2020; Wong et al., 2016)，但双语者学习的语言特征(如英文属于音位文字，中文属于语素文字)和学习经验会调节两种语言的神经网络，造成激活脑区的差异(如 DeLuca et al., 2020; Isel, 2021; Li et al., 2021; Połczyńska & Bookheimer, 2021; Wu et al., 2020; Yang et al., 2018)，或是共同激活的脑区其内部体素活动模式

收稿日期：2022-07-13
* 广东外语外贸大学外国语言学及应用语言学研究中心双语认知与发展实验室招标课题(项目号: BCD202105)、中央高校基本科研业务费专项资金资助。
通信作者：杨静, E-mail: yangjing17@zju.edu.cn

存在差异(如 Xu et al., 2017)。

然而，前人有关二语学习的相关研究，很大程度上是基于印欧语系母语者的印欧语二语学习。印欧语系(如：英语、法语、意大利语、荷兰语、俄语、印度斯坦语等)是全球约 32 亿人口的母语，也是世界上分布最广的语系。这些同一语系的语言在长期发展过程中相互影响、相互结合，因此在语音、词汇、语法上存在一定的相似性和关联性。二语习得过程中，一语的正迁移作用大，负迁移作用小。当印欧语系母语者学习汉语这种汉藏语系时，他们无法依靠一语(音位文字)学习过程中掌握的语音意识对汉字进行拼读识记，只能靠依赖视觉记忆来掌握中文方块字。他们不但需要掌握汉语里的 4 种声调变化，学习不同声调与相同音节组合形成的不同词汇(如：“妈”、“麻”、“马”、“骂”)，还需要面对汉语中常见的多音字(如“海水朝朝朝朝朝朝朝落，浮云长长长长长长长消”)。此外，汉语缺乏词形和形态变化，主要依靠词序和虚词表达一定的语法意义。这些汉语的语言特点与印欧语言相差甚远，因此印欧语母语者在学习汉语过程中，一语对汉语的二语学习正迁移少，负迁移多。因此汉语二语学习者在汉语学习过程中必然会调适其神经系统以适应汉语的学习和加工，从而也将引发不同的脑变化。

Li 和 Yang (2018)聚焦了汉语作为第二语言学习的脑机制变化，但限于当时有关研究成果较少，仅将研究按照人工语言学习和自然语言学习两种不同研究范式进行归类，未有系统发现，且在理论方面未作深入探讨。过去 5 年间，有关汉语二语学习脑机制的研究大量面世，有关二语学习及双语加工的神经语言学理论也在近两年陆续发表。本文将基于这些最新的理论框架来解释汉语二语学习的脑机制研究结果，总结探讨第二语言学习的普遍规律以及汉语二语学习的特色脑机制变化。

1.2 二语学习脑机制理论的发展

随着脑科学技术的不断革新，与二语学习脑机制变化的相关理论假说也在不断发展。早期 Perfetti 和 Liu (2005)基于汉英和英汉双语者的脑功能研究结果，提出了“同化(assimilation)−顺应(accommodation)假说”。“同化”是指母语的语言加工脑区可适应二语的语言特征，因此二语学习者会用加工母语的学习方式及神经机制来加工第二语言；而“顺应”指的是，当母语的相关语言加工脑区不适应二语的语言特征时，二语学习者需要激活额外的脑区来辅助二语加工。这一假说得到了不少研究的支持，比如汉语母语者可使用双侧梭状回处理第二语言英语(“同化”假说)，而英语母语者在学习汉语时会额外激活右额叶区(“顺应”假说) (如 Liu et al., 2007; Nelson et al., 2009)。

不仅母语和第二语言的特征会影响双语者的语言加工及其脑机制，学习者的个体差异也对第二语言学习的脑机制有不同程度的调节作用。因此 DeLuca 等(2020)提出了“联合双语经验轨迹(Unifying the Bilingual Experience Trajectories, UBET)”理论框架，强调双语经验是多维度指标构成的连续体，双语者语言表征及加工的脑机制受到不同语言经历(如语言类型、语言使用、转换频率、熟练程度、习得年龄)的塑造。

同时，Pliatsikas 等(2020)从第二语言学习动态过程的角度，基于双语儿童和成人脑结构的研究结果，提出了“动态重组模型(Dynamic Restructuring Model, DRM)”。该模型首次论述二语能力动态发展伴随的脑结构变化及其原理：在二语学习的初始阶段，语言、认知控制及记忆有关的脑区皮层厚度增加；在第二阶段，即巩固阶段，大脑皮层相关脑区的厚度恢复到学习前状态，但皮层下结构(如杏仁核、丘脑)依然保持增长势头，语言加工相关的脑白质轴突组织量增加，信息传递从而更高效；然而，到二语学习的最高水平阶段，除了小脑及局部的皮层厚度增加，负责语言控制、信息传递及存储的脑白质完整性及脑灰质容量都比巩固阶段的少。

以上理论模型，各有侧重：“顺应−同化”假说强调母语与二语差异对语言网络的影响；“联合双语经验轨迹”理论注重多维度的语言学习经验对脑机制的影响；而“动态重组模型”则阐述的是二语学习过程中学习者脑结构的动态变化。目前尚未有成熟的理论模型来阐述二语学习过程中语言认知加工的互动发展及其脑机制。汉语二语学习的脑机制变化理论也有待进一步探索和发展。

近年来，有关汉语二语学习的脑机制研究有了长足进展。本文立足国际中文教育的国家战略和学科需求，聚焦汉语作为第二语言学习的脑结构和脑功能变化，评述了过去 20 年间从语音、词汇及综合知识等不同层面探索汉语二语学习脑机

制的追踪研究，剖析本领域的研究现状及局限，并据此提出新的研究方向，以期为未来研究提供些许参考。

2　汉语二语声调学习脑功能区的动态发展

汉语是世界上使用人口最多的语言(邵敬敏, 2001)。与印欧语系相比，汉语在语音方面的特性主要表现在两个方面(王瑞明 等, 2016)。首先，汉语的音节结构以声母在前、韵母在后的单音节结构为主，汉语音节之间的界限清晰，但内部声韵母组合紧密，元音、辅音本身变得不明显，因此感知到的是单个音节(潘文国, 1997)，与英语一万左右的音节量相比，汉语音节的数量“很少”。其次，汉语作为一种声调语言，汉语声调具有区别语义的功能，声调不同则代表不同意义(如 mā“妈”、má“麻”、mǎ“马”、mà“骂”)。对于母语为非声调语言的学习者来说，汉语声调学习是汉语语音学习的难点，因而也成为了汉语语音习得研究的焦点(柯传仁, 2003)。对汉语母语者声调加工的研究表明，汉语声调加工虽然有右脑参与，但主要还是遵循语言性质的加工，以左脑加工为主，相关的脑区包括左颞上回和杏仁核，且与音段音位加工的脑神经机制存在一定程度的分离(如：胡艳梅, 徐展, 2011; 赵延鑫 等, 2016; Kwok et al., 2015)。

为了揭示西方母语者学习和加工汉语声调的脑神经机制，Wang 等(2003)在前期行为训练研究(Wang et al., 1999)的基础上，开创性地进行了汉语声调学习的脑功能研究。她带领团队对比了 6 名成年非汉语母语者(主要为英语母语者)学习汉语声调两周前后，加工汉语声调时的脑活动变化。他们发现，与学习前相比，汉语二语学习者在后测中的汉语声调加工脑区虽然激活程度没有显著变化，但是激活范围有所拓展，即在左颞上回(BA 22)及其临近的布罗德曼 42 区(BA 42)，还有右额下回的布罗德曼 44 区(BA 44)出现了更大范围的激活。右额下回(BA 44)是负责音高辨识和情感韵律加工的主要脑区，而左颞上回(BA 22)的激活表明学习者通过汉语声调训练后能将声调当作语音信息进行加工，而不仅仅是自然环境中的声学刺激。Luo 等(2006)指出，早期的汉语声调学习主要是由右脑的神经网络来负责(尤其是右额下回)，但进入汉语学习的高级阶段后，声调变成学习者区别语义信息的重要语音特征，因而逐渐在左脑的相关语言区中建立起了语义提取和加工的神经网络，对声调的加工也逐渐更加依赖左脑(尤其是左颞上回)，对右脑额下回的依赖减弱。因此，汉语二语学习者在汉语声调学习过程中经历了从右脑额下回到左脑颞上回的功能区转移，该研究结果在一定程度上支持了 Pliatsikas 等(2020)提出的“动态重组模型”假设。

上述研究探究了汉语声调的显性学习，发现与之最相关的脑区为双侧额下回和颞上回。而探索隐性汉语声调学习的脑研究发现，汉语声调序列学习得越好，其右海马回及左顶上小叶的激活更强(Ling et al., 2015)。虽然该研究聚焦隐性序列学习的认知神经机制，但研究结果也深化了汉语声调学习的相关知识。因此，汉语二语学习中词汇声调学习涉及到的重要脑区为双侧额下回和颞上回，学习过程伴随着左侧化的动态发展趋势；序列声调学习涉及到边缘系统中负责长时记忆的海马回，以及对空间序列敏感的左顶上小叶。最后，需要强调的是，由于汉语声调学习并不等同于词汇学习，后续对汉语二语学习的脑机制研究主要是将汉语词汇学习作为主要研究对象。

3　汉语二语词汇学习的脑机制

3.1　听觉词汇学习的成功依赖左颞上皮层

Wong 等(2007)认为 Wang 等(2003)的研究仅仅为声调学习的结果，而非词汇学习。为了考察个体通过识别汉语声调来区别语义信息的真实汉语词汇学习过程，并控制汉字字形结构加工对汉语声调学习的影响，Wong 等(2007)采用了人工语言训练的研究方法，让 17 名英语母语者在两周内学习听觉呈现的“汉语音节”，每个音节与一幅非生命物体(non-living object)图片配对呈现，以学习该汉语词汇对应的概念。为确保学习者真正使用汉语声调进行语义辨别，他们使用了最小对立体(minimal pairs)。在由同样元音和辅音构成的单音节上附上不同声调，形成相似的音节，但不同的图片内容，如/pesh1/对应“玻璃杯(glass)”的图片，/pesh2/对应“铅笔(pencil)”的图片。研究结果发现，不论训练前还是训练后，成功学习者(9 名)与非成功学习者(8 名)相比，在左颞上回(BA 22)有更强烈的激活，说明汉语听觉词汇学习的关键脑区在左颞上回和颞横回(BA 41)，且学习者训练前

汉语声调加工的脑功能差异可以预测汉语二语听觉词汇的学习成绩。除了对脑功能区的探究，他们还对学习者的脑结构进行了测查，发现：学习成功者左颞横回，灰质体积较大且白质体积也有增加的趋势；学习成绩与左颞横回的皮层(灰质)大小呈正相关(Wong et al., 2008)。这说明颞横回不仅是非言语音高的加工脑区，也是负责语音加工的重要脑区。为了进一步探讨语音辨识能力与词汇学习成效之间的关系，Wong 等(2011)又利用同样的人工语言训练 21 名同样背景的汉语二语学习者，通过弥散张量成像扫描，探索了他们听觉词汇学习成效与其脑结构连接之间的关系。研究结果显示，学习者左颞顶叶区腹侧通路神经纤维束的各向异性与其语音词汇学习成绩呈显著正相关，即汉语二语学习者语音词汇辨识能力越好，其左颞顶叶区腹侧通路神经纤维束结构越完整，越通畅。

除了汉语二语学习伴随的脑结构和脑功能变化的系列研究，Wong 及其团队还首创了第二语言学习的脑功能网络分析。Sheppard 等(2012)通过“小世界网络” (small-world network)的图论研究方法，重新研究了 Wong 等(2007)收集到的脑功能数据，探讨了成功学习者与非成功学习者在进行汉语语音辨识任务中大脑神经网络的加工效率。他们以脑区节点间的连接数量(edges)作为衡量脑网络连接效率的参考指标：脑区节点之间的连接数量越少，脑网络的连接效率越高。数据分析结果显示：成功学习组相比于非成功学习组，呈现出一种更高效的大脑神经网络，即局部效率较低但是全脑效率较高。该研究首次揭示了个体差异对二语学习脑功能网络连接效率的影响。但是，对于脑内神经节点之间相互影响的方向及强度，并未具体深入。

为了探究汉语听觉词汇学习的脑功能网络及因果关系，Yang 等(2015)使用统一结构方程模型(具体方法详见 Gates et al., 2010; Gates et al., 2011)，采用与 Wong 等(2007)相似的训练方式，追踪研究了英语母语者学习汉语语音词汇 6 周前后的脑功能变化，以及语言脑区的相互作用。该研究发现成功学习者相比于非成功学习者，呈现出局部和全局脑网络整合度更高的特点，多通路特质的大脑网络为成功学习者提供了更加高效和灵活的信息加工方式。而且，这种脑网络连接模式的差异早在学习训练前就已经存在。这不但说明短期的第二语言学习训练会带来大脑神经网络连接之间的改变，也再次说明语言学习依赖的脑功能网络存在先天的个体差异，会影响学习效果。Yang 和 Li (2019)在上述研究的基础上，进一步探究学习者的听觉能力对这一脑功能网络内部通道的调节作用，发现声调感知能力能有效预测其汉语词汇学习的成效。汉语词汇学习越好的学习者，其左颞横回的激活程度越高，额颞叶区腹侧通路上的脑功能连接更强。作者因此提出汉语二语学习者的汉语声调感知能力与左脑“颞上回后部→前扣带回”语言通路的连接效率呈正相关。该汉语二语听觉词汇的训练研究结果与中国人学习“韩字” (类似韩国文字的人工语言)语音的研究结果相似：学习者左颞上沟的脑激活强度与其听觉词汇学习成绩呈正相关(Mei et al., 2008)，说明汉语听觉词汇学习与左颞上皮层有紧密关联。而这些“行为−脑信号”的相关分析，不但说明汉语二语学习者的听觉感知能力可以作为其汉语学习成效的有效预测指标，也为二语学习脑研究的数据分析方法提供了新思路。

综上可知，汉语词汇的语音学习依赖左颞上皮层，且存在先天的个体差异。成功的汉语语音词汇学习者，其左颞顶叶区腹侧通路神经纤维束结构更完整、更通畅，且呈现出更高效的大脑神经网络。该研究结果符合 DeLuca 等(2020)提出的“联合双语经验轨迹”模型，即学习者的个体差异，会对第二语言学习的脑机制有不同程度的调节作用。

3.2 汉字学习与右梭状回及双侧额下回密不可分

不仅汉语的语音系统具有独特性，汉语的文字系统——汉字，也与其他语言不同。首先，汉字作为最古老的文字之一，是一种表意文字，即汉字字形不直接表示语音，但可以表意，不同汉语方言或不同时期某一个汉字读音不同，但基本意思大体一致(张桂光，2004)。其次，汉语音节少，但汉字数量多，一个字代表的语素多。如《现代汉语频率字典》中的前 1000 个常用汉字的覆盖率达到了 91.36% (王瑞明 等, 2016)，与英文中几万的单词量相比，汉字高频字多。最后，汉字最凸显的特征是其方块字结构。 在一个二维平面内，汉字的笔画、偏旁部首、甚至整字都均衡地分布在方正的框内，且偏旁部首及其位置信息都提供了

汉字识别的重要线索。因此, 这也导致了汉语的阅读与负责解析空间几何信息的右脑密不可分(Guo et al., 2022)。

为了研究汉字的学习, Xue 等(2006a)通过分阶段人工语言训练范式, 考察了中国大学生依次学习“韩字” (类似韩国文字的人工语言)的字形、语音和语义所产生的脑活动变化。结果显示韩字字形的学习伴随汉语母语者双侧梭状回的脑激活减弱, 而语音和语义学习伴随着双侧梭状回脑活动信号的增强。进一步研究发现梭状回的功能偏侧化程度能够显著预测汉语母语者的韩字字形学习成绩(Xue et al., 2006b), 且存在性别差异(Chen et al., 2007; Dong et al., 2008)。这一系列研究虽然以汉语母语者为研究对象, 学习的语言并非汉字, 但 Kim 和 Cao (2022)的后续研究证实了汉语和韩语在字形识别上相似的大脑激活模式, 这些研究结果为汉语二语字形学习的脑研究奠定了良好的基础。

为了进一步区分学习者在加工拼音文字和图形文字上的脑区异同点, Mei 等(2014)考察了英语母语者分别在学习人工拼音文字和人工图形文字的脑神经机制。他们发现, 与拼音文字学习相比, 学习图形文字与语音的联系会更多地激活右侧框额皮层和颞中回腹侧; 而拼音文字组则在左缘上回有更多激活。显然, 这样的对比研究能更细致地分离出汉语二语学习特有的脑机制。有趣的是, Mei 等(2015)指出汉语二语学习者在加工其母语(英语)时会比英语单语者在右梭状回后部有更强的脑活动, 暗示了二语学习对于母语加工的反作用。

针对汉字的内部结构——声旁和形旁——的学习和辨认, Deng 等(2008; 2011)开展了系列研究。在 Deng 等(2008)中, 他们训练了 12 名英语母语者学习含有“表意形旁”和“非表意形旁”的汉字, 来考察非汉语母语者对汉语“形旁”中语义信息的掌握和迁移情况, 并测量学习前后所引发的大脑神经机制变化。学习训练的中期和后期, 被试需要在核磁共振仪中接受有关未训练汉字的测试: 判断所看到字形的语义信息是否与所听到的英文翻译一致(其中一半的实验材料中含有被试在训练中学习过的“表意形旁”)。研究结果表明, 汉字的“形旁”学习主要依赖左梭状回、左顶叶皮层以及额下回。随后, 基于同样的实验范式, Deng 等(2011)又深入探索了英语母语者对汉字“声旁”的学习和辨认, 他们发现汉字的“声旁”学习主要依赖右舌回和左额下回。由此可见, 汉语的字形加工与大脑双侧的额下回密切相关。

综上可知, 汉字的字形加工主要依赖右梭状回以及大脑双侧额下回的参与。梭状回是负责字形识别以及面孔识别的视觉加工脑区(Mei et al., 2015), 而额下回是负责信息整合和语义表征的重要脑区(Deng et al., 2008; Deng et al., 2011)。显然, 汉字学习需要右梭状回及双侧额下回的辅助, 这也体现了汉字加工和学习的独特性。研究结果也再次支持了 DeLuca 等(2020)提出的“联合双语经验轨迹”模型, 即语言学习的类型和特征也会影响学习者二语加工的脑机制。

3.3 不同模态下汉语二语学习的脑机制

随着多媒体技术的不断革新, 外语课堂中的信息呈现方式, 也正朝着多模态的趋势发展。基于不同模态信息输入的汉语学习, 在脑机制上是否也存在差别, 这已成为研究领域的一个热点问题。Liu 等(2007)最早探索了英语母语者在不同模态条件下学习汉语词汇的大脑激活模式: “字形−语音”、“字形−字义”和“字形−语音−字义”。他们训练了 23 名英语母语者分别在这 3 种条件下各学习 20 个汉语单字名词, 经过 3 天训练(约 6~9 小时), 记录学习者观看汉字(已学习/未学习汉字)和英文单词(真词/假词)时的大脑活动。结果显示, 虽然 3 组学习者在加工对应条件学习汉字时的行为成绩和大脑激活模式并无显著差异, 但是在左额中回脑区的激活程度存在差别。其中, 观看在“字形−发音−意义”条件下学习的汉字时, 汉语学习者的左额中回激活程度最强。该结果也说明多模态情境下的汉语学习更能强化学习效应。此外, 经过汉字学习训练后的英语母语者, 展现出了与汉语母语者汉字阅读相近的大脑激活网络, 即激活了双侧额中回(BA 9)、右枕叶(BA 18/19)和右梭状回(BA 37)等区域, 而观看未学习的汉字时在右额中回有更强激活。左额中回是视觉加工以及提取字形、语音和语义信息的重要脑区(Tan et al., 2000; Tan et al., 2005), 右额中回是处理新信息的重要脑区, 而右脑腹侧的枕叶−梭状回通路则负责分析偏旁部首之间的空间关系。因此, 随着汉语二语学习者汉语水平的提高, 其汉语加工的脑机制会不断趋近于汉语母语者。

除了从听觉和视觉模态来促进汉语学习, Cao

等(2013)尝试探索了触觉在汉语学习中的作用，首次从学习汉字书写的角度，来探索书写拼音和汉字结构分别对汉字学习脑机制的影响。研究者招募了 17 名美国大学生进行汉字书写学习训练。学习测试材料为 30 个通过书写汉字笔画而学习的汉字、30 个通过书写汉语拼音而学习的汉字和 30 个未接受训练的汉字。学习结束的一周内，所有被试在磁共振仪内分别完成了汉字/英文单词观看、真假词判断和“意念式”书写任务(想象用食指进行文字书写)。研究结果显示，在真假词判断和“意念式”书写任务中，阅读通过书写训练习得的汉字相比于未训练的汉字，在双侧顶上叶区和舌状回的激活程度更高，这说明书写训练有助于建立汉字字形与其视觉空间结构上的连接表征。此外，汉字笔画的书写训练有助于汉字的语义习得，因为在阅读通过书写笔画习得的汉字时在双侧颞中回有更强的激活；而汉字拼音的书写训练有助于汉字的语音习得，因为在阅读通过书写拼音习得的汉字时，右额下回有更强的激活。而且汉字识别的准确率与右脑顶叶、舌状回以及左脑感觉运动皮层的激活程度显著相关。2017 年，Cao 及其团队报告了有关书写学习汉语二语的另一项成果。他们让两组英语母语者在两周内分别学习汉语和西班牙语。两种语言学习通过 3 种学习方式：语音、书写、注视。结果发现在语音判断任务中，汉语语音学习比西班牙语语音学习在左额下回和颞下回活动更为强烈，且书写条件比语音条件在左额中回的激活更为强烈(Cao et al., 2017)。以上研究从汉字书写的角度探讨了触觉对汉语二语学习的脑机制影响，揭示了汉语二语学习方式会影响到脑活动模式。

随着虚拟现实等技术在教育界的应用，研究者们也开始探索这些多模态教育技术及方法对二语学习的认知加工过程及其脑机制所带来的影响。Legault 等(2019)首次报告了虚拟现实情境中汉语词汇短期学习的成效及其对脑结构的影响。虚拟现实组(19 名美国大学生)与传统学习组(17 名美国大学生)均在 20 天内完成了 7 次汉语学习训练，每次都学习与动物园、超市及厨房情境有关的 90 个固定汉语词汇。两组的区别在于：传统学习组是通过电脑给被试呈现黑白图片来学习汉语词汇，被试按空格键来获取汉语词汇的语音信息；虚拟现实组则是通过被试与电脑呈现的虚拟情境互动，用鼠标点击所看到的动物或者物品，从而获得该词汇的汉语语音信息。这项有趣的研究发现，传统汉语语音词汇学习带来的是右额下回的皮层厚度增加，而虚拟现实组的学习成效则与其右顶下小叶有关。顶下小叶主要负责对来自感官的感觉进行整合，也是负责词汇学习的重要脑区。该项基于虚拟现实技术下的汉语词汇学习研究，为多模态情境下的汉语词汇学习提供了新思路。

由此可见，多模态、互动情景下的汉语词汇学习往往引发更好的学习效果，但这对学习者的信息提取、整合以及认知控制能力也提出了更高的要求，因而也触发了更强烈的大脑激活模式。上述研究的结果支持了 DeLuca 等(2020)的“联合双语经验轨迹”模型，即汉语的不同学习方式和学习情境会导致大脑在语言加工上神经机制的差异。这些在汉语二语学习方式上的探索，在一定程度上，也开启了汉语二语学习、乃至第二语言学习研究的新方向，对疫情下更为广泛的在线教育和中文远程国际教育均具有现实价值。

4 汉语二语综合知识学习的脑机制

近年来，除了实验室条件下的汉语专项训练(声调、词汇的语音和字形)研究，越来越多的科学家对自然语言环境中系统学习中文课程的汉语二语学习者进行了脑机制的追踪研究。

Nelson 等(2009)最早开展了在自然语言课堂环境中学习汉语的脑功能研究。他们比较了 6 名在美国匹兹堡大学完成了一年汉语课程学习的英语母语者，与 11 名汉英双语者在阅读英文和中文词汇时大脑梭状回区域的脑激活模式。研究者发现，母语为汉语的双语者，在观看中文和英文词汇时，激活了大脑双侧的梭状回区域；但对于学习汉语的英语母语者，观看英语词汇时主要激活了左侧的梭状回区域，而观看汉语时激活了双侧梭状回的区域。这一研究结果与人工语言训练的汉字二语学习结果相似，强调了双侧梭状回，尤其是右侧梭状回在汉语二语学习中的重要作用。

为了进一步观测汉语二语学习者在汉语学习过程中脑机制随语言水平的动态变化，Schlegel 等(2012)邀请了实验组的 11 名英语母语者和控制组的 16 名英语母语者在连续 9 个月的每个月里，都接受弥散张量成像扫描，以探究汉语二语水平与

脑白质结构的关联。其中, 11 名实验组被试参加了为期 9 个月的当代汉语强化课程学习, 每周的学习时长约 7.5 个小时, 研究者通过作业反馈的形式来强化学习者的汉语听说读写能力。研究结果显示, 相比于未学习汉语课程的控制组, 实验组被试在右半脑的语言加工区域和连接胼胝体膝侧的额叶轴突白质完整性的各向异性(FA)值, 与学习者掌握的汉语知识呈正相关。这表明成人在自然环境中的汉语学习会引发右侧大脑的白质结构改变, 并且白质完整性的 FA 值会随着语言水平提高而增加。

这一研究结论与 Qi 等(2015)为期一个月的汉语二语学习追踪研究发现相似。Qi 等邀请了 21 名成人英语母语者参加了为期 4 周的汉语普通话课程训练, 并通过作业和小测等形式来综合提高学习者的读写能力。课程结束时, 学习者接受口试和纸笔测试。学习者在参加训练的前后均接受了 DTI 扫描, 结果显示: 成功学习者在右脑的上纵束(顶束)和下纵束的白质 FA 值更高, 而与左脑白质的 FA 值变化无关。这说明学习者的汉语学习成效与其右脑白质完整性的变化呈正相关, 而这种右偏侧化的脑结构变化可能是为了满足汉语声调和汉字字形加工的需求, 符合 Perfetti 和 Liu (2005)关于"同化−顺应"假说中"顺应"的假设。

为了探索汉语二语学习对学习者脑功能区的长期影响, Qi 等(2019)在其 2015 年的研究范式基础上, 对这些汉语学习者追加了课程结束 3 个月后的磁共振扫描, 即加上语言课程学习前后一共 3 次汉语声调辨别任务的磁共振扫描。结果发现, 在参加课程训练前的汉语声调听辨能力测试中, 学习者右额下回的激活程度与其汉语学习成效呈显著正相关; 在课程培训结束后的汉语声调听辨测试中, 学习者在左额下回和左顶上小叶出现激活, 而右额下回的激活程度减弱。因此, 该研究指出英语母语者在汉语学习前期需要右额下回的参与, 但在长期的汉语学习及能力发展中, 对右额下回的参与需求减弱。该研究结果印证了他们之前对这批被试的脑结构分析: 汉语学习越好, 其右顶叶上下纵束的完整性更好。这也与训练研究中发现的结果一致: 汉语学习初始阶段右脑起重要作用, 而学习后期以左侧化语言加工为主。该研究结果在一定程度上也支持了 Pliatsikas 等(2020)提出"动态重组模型", 即二语加工的脑功能区会随着二语学习的进程而发生动态变化。

综上所述, 汉语综合知识学习与汉语声调及词汇学习的研究结果相似, 脑结构研究的结果与脑功能研究的发现相互印证(如 Wang et al., 2003; Wong et al., 2007; Wong et al., 2011; Qi et al., 2015; Qi et al., 2019)。脑结构的变化是对脑功能活动动态适应的结果(Lövdén et al., 2013), 也是学习活动"量变"引发脑结构"质变"的必然趋势。因此, 即便是成年后进行汉语第二语言学习, 学习者的脑机制依然能在短期(如 5 天)内产生显著变化。相对而言, 针对汉语的综合知识学习, 在语法专项学习方面的脑机制研究较少, 这些都有待在今后的相关研究中不断深入探索。

5　前景展望和发展方向

汉语在声调、语音和字形等方面的独特性, 构成了汉语作为第二语言学习认知神经科学研究的最初动力。神经科学为我们了解汉语二语学习的脑机制提供了方法和手段。 历经 20 年, 研究者对汉语的声调、语音、字形、语义、书写学习的脑机制有了长足的了解。汉语声调学习最初依赖右脑的颞上回和额下回, 待完全掌握后转为依赖左脑语言功能区(尤其是左颞上回)。语音词汇学习不但依赖左颞上回, 更与左颞上回到额叶腹侧语言通路的功能和结构连接息息相关。汉字字形学习则与额下回以及右梭状回偏侧化的功能有关, 这由汉字的字形结构特色决定。汉字书写习得与额中回密不可分, 这或许与额中回在工作记忆及语音语义信息整合中扮演的重要角色有关。最后, 在汉语自然课堂的二语综合知识学习追踪研究中, 也同样发现了长期的汉语二语学习会引起右脑重要脑区(额下回、梭状回等)功能和脑白质结构连接的改变。

综上可见, 汉语二语学习的脑机制主要有三个特征。首先, 汉语二语学习与右脑关系更为密切。受汉语及汉字特征决定, 与拼音文字相比, 汉语学习初期右侧脑区起重要作用, 学习后期仍然以左侧化语言加工为主。如汉语语音学习的过程中, 脑功能区经历了由右侧主导转为双侧化甚至左侧化的动态大脑发展变化过程; 无论是在自然学习环境还是实验室训练条件下, 都发现双侧额下回及右侧梭状回在汉字学习中扮演的重要角色; 来自脑结构的研究数据也支持汉语学习初始阶段

右侧脑区扮演的重要作用，学习后期则是以左侧化语言加工为主，伴随双侧或左侧脑结构连接增强。其次，汉语二语学习与学习者的语音听辨能力密切相关。学习者声调感知能力依赖语言腹侧通路，且神经纤维束结构越完整、越通畅、功能连接越紧密，语音辨识及听觉词汇辨别成绩越好，能有效预测其汉语词汇学习的成效，且存在先天个体差异。第三，汉语二语学习方式调节汉语加工的语言功能区及其结构。如阅读通过书写笔画习得的汉字时在双侧颞中回有更强的激活，而阅读通过书写拼音习得的汉字时在右额下回有更强的激活；传统汉语语音学习带来的是右额下回的皮层厚度增加，而虚拟现实学习成效则与负责感觉信息整合的右顶下小叶有关。

基于汉语二语学习脑机制的研究发现，目前与“顺应−同化”假说相符，如汉语二语学习者在学习汉字“形−音−义”时额外激活了右侧的脑区，说明汉语区别于印欧语系的语言特征，确实会调用二语学习者的右侧脑区来完成汉语学习及汉语加工任务，这种顺应机制是汉语二语学习的特征之一。同时，汉语二语学习的脑机制变化也支持“动态重组模型”。该模型认为二语学习的不同阶段会伴随着大脑功能和结构的动态变化。汉语二语学习者在汉语声调学习过程中经历了从右额下回到左颞上回的功能区转移，且随着汉语水平的提高，对右脑功能区的依赖逐渐减弱。这种汉语加工相关脑区的动态重组，也体现了汉语二语学习的特点：双侧脑区动态重组。然而现有的二语学习认知神经机制的理论模型并未考虑目标学习语言的特征所导致的第二语言学习脑机制的共性和特性。此外，学习者的个体差异、学习方式和学习情景差异也会导致大脑的神经机制差异。如成功的汉语语音学习者，其左颞顶叶区腹侧通路神经纤维束结构更完整、更通畅，且呈现出更高效的大脑神经网络。传统汉语学习方法下的语音学习会导致右额下回的皮层厚度增加，而虚拟现实技术下的学习成效则与其右顶下小叶有关。这些研究结果虽是补充了“联合双语经验轨迹”等现有理论，但目前的理论框架显然需要突破，只有将二语的语言特征、学习者的个体差异以及学习方式和情景一并考虑进来，才能不断完善二语学习的脑机制理论。

汉语二语学习脑机制的探索对现实的汉语二语教学也提供了指导意义。比如，可以在汉语二语教学中引入多媒体技术，给学习者提供沉浸式的学习体验，促进右顶下小叶的参与，建立感官信息与文字信息的深度整合，以期达到更好的二语学习效果。在学习汉语的字形时，也可进行汉字笔画的书写训练，以促进大脑双侧颞额叶区的参与，帮助汉语二语学习者建立与汉语母语者同样的语言加工模式。甚至，我们可以通过语音听辨能力测试，对学习者的汉语学习能力做预测，来重点引导和培养潜在的外语学习人才。

前人在汉语二语学习脑机制研究思路和研究方法上的开拓，对未来的汉语二语学习研究具有深刻的借鉴和指导意义。在前人研究的基础上，汉语二语学习脑机制的探索还可进一步在以下方面进行创新拓展。

首先，儿童二语学习者。目前研究普遍招募的是成年英语母语者。鉴于儿童语言加工的脑机制可能不同于成人(Kersey et al., 2019)，儿童的汉语二语学习脑机制有可能也异于成人。如 Feng 等(2020)发现母语分别为汉语和法语的儿童在使用各自语言进行文本阅读时，呈现出相似的大脑激活模式(激活了左侧梭状回、颞上回/沟、中央前回以及额中回等区域)，这种激活模式并不会受到语言系统本身或者被试语言能力的影响。因此，汉语二语学习的脑机制研究不应仅限于晚期成人学习者，还需考量儿童学习者，以及早期汉语二语学习者。

其次，高熟练水平二语学习者。由于追踪研究方法的限制，通常对学习者进行观测的时间不长，无法长期追踪学习者至其达到高熟练水平阶段。Lai 等(2021)对比了高水平汉语二语学习者相较于汉语母语者在加工汉语词汇语义任务时的大脑激活模式，发现高水平汉语二语学习者在双侧枕叶以及右顶上小叶有更强的激活，而在双侧的颞叶激活更弱。还有研究发现随着二语学习者二语水平的提高，其大脑加工二语的模式越来越接近二语母语者的脑活动(Sebastian et al., 2011)，其脑结构也会发生质变(Pliatsikas et al., 2020)。汉语二语学习研究发现提醒我们，不同语言水平的被试在完成同样的语音或语义任务时，其大脑的处理模式可能会有所区别。而大脑对二语加工的脑机制随二语熟练水平变化的动态发展趋势，还有待更多长期追踪性研究的深入探讨。

第三，汉语语法学习的脑机制。显然，目前对汉语二语句法结构、篇章结构加工的神经机制研究较少(Chen et al., 2019)，汉语二语语法学习的研究尚未起步，亟需学界努力探索可行的研究思路和研究范式。目前已有不少实验研究尝试同步结合高空间分辨率的磁共振成像技术与眼动或者脑电技术，从时间和空间双维度来观察学习者在语言加工中的大脑神经机制(Henderson et al., 2015; Söderström et al., 2017)。未来对汉语作为第二语言学习的句法和篇章结构学习，也可参考此类研究范式，以拓展对汉语作为第二语言学习神经机制的深入探讨。

最后，语言学习、认知发展与脑网络重组的相互促进。从磁共振成像数据的收集和分析视角来看，未来的研究应努力将第二语言学习中的行为数据、脑功能数据和脑结构数据进行系统性地收集和分析(如 Wong et al., 2007; Wong et al., 2008; Wong et al., 2011)。虽然已有越来越多的研究将脑功能网络或者脑白质结构各向异性与汉语二语学习进行关联分析，未来仍需在此基础上，探讨语言学习、认知发展、脑结构及功能发展三者之间的互动，以及相互的促进作用，尤其可重点研究正在经历脑发育的儿童及青少年群体。涵盖注意、记忆、认知控制以及语言发展的脑研究，将为语言学习中的个体差异，以及贯穿生命发展周期的认知能力变化予以重要启示(Bassett et al., 2011; Uddin et al., 2011)。

随着交叉学科之间技术的融合以及数据分析思路的拓展，汉语作为第二语言学习的认知神经理论势必形成。Li 和 Jeong (2020)针对成年人的第二语言学习，结合行为研究和脑成像研究的证据，提出了“社交型二语学习” (Social L2 learning, SL2)模型。他们指出，第二语言学习的脑机制研究，绝不该仅局限于对个体的语言系统、记忆系统、以及执行控制系统进行探索，还可以从个体与外部环境进行交互时的感觉运动系统、以及语用学中的思维和情感系统进行探索。汉语二语学习的脑机制研究随着新的“社交型二语学习”理论、虚拟现实技术、在线教学等新理论新技术的出现，势必还会有所创新和突破，为第二语言学习的研究领域提供有益的补充和增长点。此外，随着神经科学技术的不断革新，未来还可进一步探索在不同的社交情景下的二语学习的脑机制变化，如师生互动、同伴互动、人机互动等。从语言学习方式的角度，不断拓展我们对脑可塑性的认知。

致谢：感谢《心理科学进展》的编辑和评审专家对本文提出的宝贵修改意见，以及 Dr. Helen Zhao 对本文英文摘要部分的语言润色。

参考文献

胡艳梅, 徐展. (2011). 汉语声调加工过程的脑神经机制述评. *心理科学, 34*(1), 196–200.

柯传仁. (2003). 回顾与展望:美国汉语教学理论研究述评. *语言教学与研究,* (3), 1–17.

梅磊磊, 屈婧, 李会玲. (2017). 第二语言学习的认知神经机制. *华南师范大学学报:社会科学版,* (6), 63–73.

潘文国. (1997). *汉英语对比纲要* (pp. 158–159). 北京：北京语言文化大学出版社.

邵敬敏. (2001). *现代汉语通论* (pp. 2). 上海：上海教育出版社.

王瑞明, 杨静, 李利. (2016). *第二语言学习* (pp. 319−320). 上海：华东师范大学出版社.

张桂光. (2004). *汉字学简论* (pp. 39–42). 广州：广东高等教育出版社.

赵延鑫, 陈希琢, 南云. (2016). 汉语声调认知加工的脑机制及语言经验的影响. *心理科学, 39*(4), 875–880.

Bassett, D. S., Wymbs, N. F., Porter, M. A., Mucha, P. J., Carlson, J. M., & Grafton, S. T. (2011). Dynamic reconfiguration of human brain networks during learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(18), 7641–7646.

Cao, F., Sussman, B. L., Rios, V., Yan, X., Wang, Z., Spray, G. J., & Mack, R. M. (2017). Different mechanisms in learning different second languages: Evidence from English speakers learning Chinese and Spanish. *NeuroImage*, *148*, 284–295.

Cao, F., Vu, M., Chan, L., Ho, D., Lawrence, J. M., Harris, L. N., ... Perfetti, C. A. (2013). Writing affects the brain network of reading in Chinese: A functional magnetic resonance imaging study. *Human Brain Mapping*, *34*(7), 1670–1684.

Chen, C., Xue, G., Dong, Q., Jin, Z., Li, T., Xue, F., ... Guo, Y. (2007). Sex determines the neurofunctional predictors of visual word learning. *Neuropsychologia*, *45*(4), 741–747.

Chen, L., Wu, J., Fu, Y., Kang, H., & Feng, L. (2019). Neural substrates of word category information as the basis of syntactic processing. *Human Brain Mapping*, *40*(2), 451–464.

Crinion, J. T., Green, D. W., Chung, R., Ali, N., Grogan, A., Price, G. R., ... Price, C. J. (2009). Neuroanatomical markers of speaking Chinese. *Human Brain Mapping,*

30(12), 4108–4115.

DeLuca, V., Segaert, K., Mazaheri, A., & Krott, A. (2020). Understanding bilingual brain function and structure changes? U bet! A unified bilingual experience trajectory model. *Journal of Neurolinguistics*, *56*, 100930.

Deng, Y., Booth, J. R., Chou, T.-L., Ding, G.-S., & Peng, D.-L. (2008). Item-specific and generalization effects on brain activation when learning Chinese characters. *Neuropsychologia*, *46*(7), 1864–1876.

Deng, Y., Chou, T. L., Ding, G. S., Peng, D. L., & Booth, J. R. (2011). The involvement of occipital and inferior frontal cortex in the phonological learning of Chinese characters. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*(8), 1998–2012.

Dong, Q., Mei, L., Xue, G., Chen, C., Li, T., Xue, F., & Huang, S. (2008). Sex-dependent neurofunctional predictors of long-term maintenance of visual word learning. *Neuroscience Letters*, *430*(2), 87–91.

Feng, X., Altarelli, I., Monzalvo, K., Ding, G., Ramus, F., Shu, H., ... Dehaene-Lambertz, G. (2020). A universal reading network and its modulation by writing system and reading ability in French and Chinese children. *Elife*, *9*, e54591.

Gates, K. M., Molenaar, P. C., Hillary, F. G., Ram, N., & Rovine, M. J. (2010). Automatic search for fMRI connectivity mapping: An alternative to Granger causality testing using formal equivalences among SEM path modeling, VAR, and unified SEM. *NeuroImage*, *50*(3), 1118–1125.

Gates, K. M., Molenaar, P. C., Hillary, F. G., & Slobounov, S. (2011). Extended unified SEM approach for modeling event-related fMRI data. *NeuroImage*, *54*(2), 1151–1158.

Guo, W., Geng, S., Cao, M., & Feng, J. (2022). The brain connectome for Chinese reading. *Neuroscience Bulletin*, *38*(9), 1097–1113.

Henderson, J. M., Choi, W., Luke, S. G., & Desai, R. H. (2015). Neural correlates of fixation duration in natural reading: Evidence from fixation-related fMRI. *NeuroImage, 119*, 390–397.

Isel, F. (2021). Neuroplasticity of second language vocabulary acquisition: The role of linguistic experience in individual learning. *Language, Interaction and Acquisition*, *12*(1), 54–81.

Kersey, A. J., Wakim, K.-M., Li, R., & Cantlon, J. F. (2019). Developing, mature, and unique functions of the child's brain in reading and mathematics. *Developmental Cognitive Neuroscience 39*: 100684.

Kim, S. Y., & Cao, F. (2022). How does the brain read different scripts? Evidence from English, Korean, and Chinese. *Reading and Writing*, *35*(6), 1449–1473.

Klein, D., Mok, K., Chen, J.-K., & Watkins, K. E. (2014). Age of language learning shapes brain structure: A cortical thickness study of bilingual and monolingual individuals. *Brain and Language, 131*, 20–24.

Kwok, V. P., Wang, T., Chen, S., Yakpo, K., Zhu, L., Fox, P. T., & Tan, L. H. (2015). Neural signatures of lexical tone reading. *Human Brain Mapping*, *36*(1), 304–312.

Lai, C.-H., Hsieh, S.-K., Lee, C.-L., Su, L. I.-W., Liu, T.-H., Lu, C.-R., ... Chou, T.-L. (2021). Neurocognitive differences in semantic processing between native speakers and proficient learners of Mandarin Chinese. *Frontiers in Psychology*, *12*, 781304.

Legault, J., Fang, S.-Y., Lan, Y.-J., & Li, P. (2019). Structural brain changes as a function of second language vocabulary training: Effects of learning context. *Brain and Cognition*, *134*, 90–102.

Li, H., Zhang, J., & Ding, G. (2021). Reading across writing systems: A meta-analysis of the neural correlates for first and second language reading. *Bilingualism: Language and Cognition*, *24*(3), 537–548.

Li, P., & Jeong, H. (2020). The social brain of language: Grounding second language learning in social interaction. *npj Science of Learning, 5*(8), 1–8.

Li, P., Legault, J., & Litcofsky, K. A. (2014). Neuroplasticity as a function of second language learning: Anatomical changes in the human brain. *Cortex, 58*, 301–324.

Li, P. & Yang, J. (2018). *Neurocognitive approaches to Chinese second language learning* (pp.11–30). The Routledge Handbook of Chinese Second Language Acquisition.

Ling, X., Guo, X., Zheng, L., Li, L., Chen, M., Wang, Q., ... Dienes, Z. (2015). The neural basis of implicit learning of task-irrelevant Chinese tonal sequence. *Experimental Brain Research*, *233*(4), 1125–1136.

Liu, C., Jiao, L., Timmer, K., & Wang, R. (2021). Structural brain changes with second language learning: A longitudinal voxel-based morphometry study. *Brain and Language*, *222*, 105015.

Liu, H., & Cao, F. (2016). L1 and L2 processing in the bilingual brain: A meta-analysis of neuroimaging studies. *Brain and Language*, *159*, 60–73.

Liu, Y., Dunlap, S., Fiez, J., & Perfetti, C. (2007). Evidence for neural accommodation to a writing system following learning. *Human Brain Mapping, 28*(11), 1223–1234.

Lövdén, M., Wenger, E., Mårtensson, J., Lindenberger, U., & Bäckman, L. (2013). Structural brain plasticity in adult learning and development. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *37*(9), 2296–2310.

Luo, H., Ni, J.-T., Li, Z.-H., Li, X.-O., Zhang, D.-R., Zeng, F.-G., & Chen, L. (2006). Opposite patterns of hemisphere dominance for early auditory processing of lexical tones and consonants. *Proceedings of the National Academy of*

Sciences, 103(51), 19558–19563.

Mårtensson, J., Eriksson, J., Bodammer, N. C., Lindgren, M., Johansson, M., Nyberg, L., & Lövdén, M. (2012). Growth of language-related brain areas after foreign language learning. *NeuroImage, 63*(1), 240–244.

Mei, L., Chen, C., Xue, G., He, Q., Li, T., Xue, F., ... Dong, Q. (2008). Neural predictors of auditory word learning. *Neuroreport*, *19*(2), 215–219.

Mei, L., Xue, G., Lu, Z.-L., Chen, C., Wei, M., He, Q., & Dong, Q. (2015). Long-term experience with Chinese language shapes the fusiform asymmetry of English reading. *NeuroImage*, *110*, 3–10.

Mei, L., Xue, G., Lu, Z.-L., He, Q., Zhang, M., Wei, M., ... Dong, Q. (2014). Artificial language training reveals the neural substrates underlying addressed and assembled phonologies. *Plos One*, *9*(3), e93548.

Nelson, J. R., Liu, Y., Fiez, J., & Perfetti, C. A. (2009). Assimilation and accommodation patterns in ventral occipitotemporal cortex in learning a second writing system. *Human Brain Mapping*, *30*(3), 810–820.

Nichols, E. S., & Joanisse, M. F. (2016). Functional activity and white matter microstructure reveal the independent effects of age of acquisition and proficiency on second-language learning. *Neuroimage, 143*, 15–25.

Perfetti, C. A., & Liu, Y. (2005). Orthography to phonology and meaning: Comparisons across and within writing systems. *Reading & Writing, 18*(3), 193–210.

Pliatsikas, C., Deluca, V., & Voits, T. (2020). The many shades of bilingualism: Language experiences modulate adaptations in brain structure. *Language Learning, 70*(52), 133–149.

Połczyńska, M. M., & Bookheimer, S. Y. (2021). General principles governing the amount of neuroanatomical overlap between languages in bilinguals. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *130*, 1–14.

Qi, Z., Han, M., Garel, K., San Chen, E., & Gabrieli, J. D. (2015). White-matter structure in the right hemisphere predicts Mandarin Chinese learning success. *Journal of Neurolinguistics*, *33*, 14–28.

Qi, Z., Han, M., Wang, Y., de los Angeles, C., Liu, Q., Garel, K., ... Perrachione, T. K. (2019). Speech processing and plasticity in the right hemisphere predict variation in adult foreign language learning. *NeuroImage, 192*, 76–87.

Saidi, L. G., Perlbarg, V., Marrelec, G., Pélégrini-Issac, M., Benali, H., & Ansaldo, A.-I. (2013). Functional connectivity changes in second language vocabulary learning. *Brain and Language*, *124*(1), 56–65.

Schlegel, A. A., Rudelson, J. J., & Peter, U. T. (2012). White matter structure changes as adults learn a second language. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *24*(8), 1664–1670.

Sebastian, R., Laird, A. R., & Kiran, S. (2011). Meta-analysis of the neural representation of first language and second language. *Applied Psycholinguistics, 32*(4), 799–819.

Sheppard, J. P., Wang, J.-P., & Wong, P. C. (2012). Large-scale cortical network properties predict future sound-to-word learning success. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *24*(5), 1087–1103.

Söderström, P., Horne, M., Mannfolk, P., van Westen, D., & Roll, M. (2017). Tone-grammar association within words: Concurrent ERP and fMRI show rapid neural pre-activation and involvement of left inferior frontal gyrus in pseudoword processing. *Brain and Language, 174*, 119–126.

Sulpizio, S., Del Maschio, N., Fedeli, D., & Abutalebi, J. (2020). Bilingual language processing: A meta-analysis of functional neuroimaging studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *108*, 834–853.

Tan, L. H., Laird, A. R., Li, K., & Fox, P. T. (2005). Neuroanatomical correlates of phonological processing of Chinese characters and alphabetic words: A meta-analysis. *Human Brain Mapping, 25*(1), 83–91.

Tan, L. H., Spinks, J. A., Gao, J. H., Liu, H. L., Perfetti, C. A., Xiong, J., ... Fox, P. T. (2000). Brain activation in the processing of Chinese characters and words: A functional MRI study. *Human Brain Mapping*, *10*(1), 16–27.

Uddin, L. Q., Supekar, K. S., Ryali, S., & Menon, V. (2011). Dynamic reconfiguration of structural and functional connectivity across core neurocognitive brain networks with development. *Journal of Neuroscience*, *31*(50), 18578–18589.

Veroude, K., Norris, D. G., Shumskaya, E., Gullberg, M., & Indefrey, P. (2010). Functional connectivity between brain regions involved in learning words of a new language. *Brain and Language, 113*(1), 21–27.

Wang, Y., Sereno, J. A., Jongman, A., & Hirsch, J. (2003). FMRI evidence for cortical modification during learning of Mandarin lexical tone. *Journal of Cognitive Neuroscience, 15*(7), 1019–1027.

Wang, Y., Spence, M. M., Jongman, A., & Sereno, J. A. (1999). Training American listeners to perceive Mandarin tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *106*(6), 3649–3658.

Wong, B., Yin, B., & O'Brien, B. (2016). Neurolinguistics: Structure, function, and connectivity in the bilingual brain. *BioMed Research International*, *2016*, 1–22.

Wong, F. C., Chandrasekaran, B., Garibaldi, K., & Wong, P. C. (2011). White matter anisotropy in the ventral language pathway predicts sound-to-word learning success. *The Journal of Neuroscience*, *31*(24), 8780–8785.

Wong, P. C., Warrier, C. M., Penhune, V. B., Roy, A. K., Sadehh, A., Parrish, T. B., & Zatorre, R. J. (2008). Volume

of left Heschl's gyrus and linguistic pitch learning. *Cerebral Cortex*, *18*(4), 828–836.

Wong, P., Perrachione, T. K., & Parrish, T. B. (2007). Neural characteristics of successful and less successful speech and word learning in adults. *Human Brain Mapping*, *28*(10), 995–1006.

Wu, J., Zhang, Z., Chen, M., Yuan, Q., Zhang, M., Yang, J., ... Guo, T. (2020). Language context tunes brain network for language control in bilingual language production. *Neuropsychologia*, *147*, 107592.

Xu, M., Baldauf, D., Chang, C. Q., Desimone, R., & Tan, L. H. (2017). Distinct distributed patterns of neural activity are associated with two languages in the bilingual brain. *Science advances*, *3*(7), e1603309.

Xue, G., Chen, C., Jin, Z., & Dong, Q. (2006a). Language experience shapes fusiform activation when processing a logographic artificial language: An fMRI training study. *Neuroimage*, *31*(3), 1315–1326.

Xue, G., Chen, C., Jin, Z., & Dong, Q. (2006b). Cerebral asymmetry in the fusiform areas predicted the efficiency of learning a new writing system. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*(6), 923–931.

Yang, J., Gates, K. M., Molenaar, P., & Li, P. (2015). Neural changes underlying successful second language word learning: An fMRI study. *Journal of Neurolinguistics*, *33*, 29–49.

Yang, J., & Li, P. (2019). Mechanisms for auditory perception: A neurocognitive study of second Language learning of Mandarin Chinese. *Brain Sciences, 9*(6), 139.

Yang, J., Ye, J., Wang, R., Zhou, K., & Wu, Y. J. (2018). Bilingual contexts modulate the inhibitory control network. *Frontiers in Psychology*, *9*, 395.

Brain mechanism underlying learning Chinese as a second language

ZHANG Caihui[1,2], YE Jianqiao[2,3], YANG Jing[4]

([1] *Bilingual Cognition and Development Lab, Center for Linguistics and Applied Linguistics, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou* 510420, *China*)

([2] *Faculty of English Language and Culture, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou* 510420, *China*)

([3] *Bluesail Surgical Co., Ltd., Shanghai* 201318, *China*)

([4] *School of International Studies, Zhejiang University, Hangzhou* 310058, *China*)

Abstract: With the fast growth of the Chinese economy, the Chinese language has become one of the most widely spoken world languages. There is a steady growth of empirical studies on the neural mechanisms underlying the learning of Chinese as a second language (L2). Yet, research on the specific brain mechanisms and the corresponding theoretical models for Chinese L2 learning are still in their infancy. Research in the past two decades has revealed that: 1) Chinese tone learning relies on the brain areas of the right superior temporal gyrus and the inferior frontal gyrus when learners are at a lower L2 proficiency, and then shifts to the left superior temporal gyrus as they reach advanced proficiency; 2) Chinese character learning is related to bilateral inferior frontal gyri and the right fusiform gyrus, whereas Chinese phonological learning is closely related to the left temporal-parietal areas; 3) Overall, Chinese L2 learning relies more on right-hemisphere brain regions (e.g., inferior frontal gyrus, fusiform gyrus) at the early stages of L2 learning, and the reliance decreases with the improvement of L2 competence. To sum up, Chinese L2 learning undergoes a dynamic neural change from an early stage of right-hemisphere reliance to a later stage of bilateralization or left-lateralization. L2 learning strategies and learners' auditory perception abilities are found to influence brain functions, neural structures, and connectivity networks. Future research on Chinese L2 learning can investigate learners of varying characteristics, triangulate research paradigms, and synthesize behavioural, functional and structural brain imaging data altogether to find efficient Chinese L2 learning strategies. More future research in this field will advance the current theoretical models and understanding of neuroplasticity in Chinese L2 learning.

Keywords: Chinese as a second language, magnetic resonance imaging, brain function, brain structure, functional brain network